



## MODELO DE ZONAS POTENCIALES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LA ENFERMEDAD DEL HUANGLONGBING EN EL ESTADO DE TABASCO †

### [MODEL OF POTENTIAL AREAS FOR THE ESTABLISHMENT OF HUANGLONGBING DISEASE IN THE STATE OF TABASCO]

G. Y. Martínez-Martínez<sup>1</sup>, S. del C. Ruíz-Acosta<sup>2</sup>, A. Olvera-Vargas<sup>3</sup>, R. Sánchez-Hernández<sup>4</sup> and A. Galindo-Alcántara<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ciencias Biológicas. Carretera Villahermosa-Cárdenas, Km 0.5. Villahermosa, Tabasco, México. CP. 86287. agro\_martinez@hotmail.com

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México. IT de la Zona Olmeca. Ocuilzapotlán, Centro, Tabasco, México, C. P. 86270. silvia.ra@zolmeca.tecnm.mx

<sup>3</sup>Cátedra CONACyT-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Normalistas 800 Colinas de la Normal, Guadalajara, Jalisco, México. CP 44270. lolvera@ciatej.mx

<sup>4</sup>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas. Carretera Villahermosa-Teapa, Km 25. Villahermosa, Tabasco, México. CP. 86012. rusaher@hotmail.com

<sup>5</sup>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas. Carretera Villahermosa-Cárdenas, Km 0.5. Villahermosa, Tabasco, México. CP. 86287. aga2003a@hotmail.com

\*Corresponding author

#### SUMMARY

**Background.** Huanglongbing is a lethal disease for citrus, affecting all citrus species, causing young plants that become infected fail to produce and adult plants become unproductive for a period of two to five years. **Objective.** The objective of this study was to determine the potential areas for the establishment of huanglongbing in Tabasco. **Methodology.** In order to achieve this objective, the model of maximum entropy (MaxEnt) was used, which is a general purpose machine learning method. For its validation, the Receiver Operating Characteristic (ROC) technique applied in presence-only distribution models was applied. To generate the model, 19 climatic variables taken from Worldclim were used, a soil variable taken from Jiménez *et al.*, (2013) and 195 records of the presence of *Candidatus Liberibacter asiaticus* detected in plant material were used. **Results.** The results show that the municipalities of Huimanguillo and Balancán are the areas with the greatest potential distribution of the disease with values greater than 0.7. According to the area under the curve (AUC), the model has a high ability to predict correctly by presenting values of 0.936 in the training data. **Implications.** The present study could contribute to the planning of surveillance areas for the detection and control of huanglongbing disease. **Conclusion.** The model obtained is a good approximation of the potential presence of the disease in the state of Tabasco, giving clarity when choosing the surveillance areas for the pathogen and its vector.

**Key Words:** Geospatial analysis; phytopathology; HLB; MaxEnt; climatic variables.

#### RESUMEN

**Antecedentes.** Huanglongbing es una enfermedad letal para los cítricos, afecta a todas las especies cítricas, provocando que las plantas jóvenes que se infectan no lleguen a producir y las plantas adultas se vuelvan improductivas en un periodo de dos a cinco años. **Objetivo.** El objetivo del presente estudio fue determinar las zonas potenciales para el establecimiento del huanglongbing en Tabasco. **Metodología.** Para lograr este objetivo se utilizó el modelo de máxima entropía (MaxEnt), el cual es un método de aprendizaje automático de propósito general. Para su validación se aplicó la técnica Receiver Operating Characteristic (ROC) aplicada en modelos de distribución de solo presencia. Para generar el modelo se utilizaron 19 variables climáticas tomadas de Worldclim, una variable edafológica tomada de Jiménez *et al.*, (2013) y se usaron 195 registros de presencia de *Candidatus Liberibacter asiaticus* detectados en material vegetal. **Resultados.** Los resultados muestran que los municipios de Huimanguillo y Balancán son las áreas de mayor distribución potencial de la enfermedad con valores mayores a 0.7. De acuerdo con el área bajo la curva (AUC), el modelo tiene una alta capacidad de predecir correctamente al presentar valores de 0.936 en los datos de

† Submitted October 21, 2020 – Accepted May 17, 2021. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License. ISSN: 1870-0462.

entrenamiento. **Implicaciones.** El presente estudio podría contribuir a la planeación de zonas de vigilancia para la detección y control de la enfermedad del huanglongbing. **Conclusión.** El modelo que se obtuvo es una buena aproximación de la presencia potencial de la enfermedad en el estado de Tabasco, dando claridad al momento de elegir las zonas de vigilancia del patógeno y su vector.

**Palabras clave:** análisis geoespacial; fitopatología; HLB; MaxEnt; variables climáticas.

## INTRODUCCIÓN

El Huanglongbing (HLB) es una enfermedad provocada por varias especies del género *Candidatus Liberibacter* (Mora-Aguilera *et al.*, 2014). Actualmente es una de las enfermedades más graves que afectan a la citricultura mundial ya que al no existir una fuente de resistencia genética para enfrentarla, puede atacar en distintos grados a todas las variedades de cítricos, ocasionando graves daños en las zonas donde se establece (SADER, 2018). El agente causal obstruye el floema impidiendo la distribución de la savia y provoca la baja calidad de los frutos (Gottwald, *et al.*, 1991; Bové, 2012). Los síntomas varían en función de las variedades y edad de la planta afectada, siendo los árboles jóvenes y vigorosos los que muestran una sintomatología más marcada (Gutierrez, 2014). En el caso de cítricos agrios, la lámina foliar de plantas infectadas presenta puntos cloróticos, manchas angulares, acorchamiento y engrosamiento de nervaduras, moteado, clorosis difusa y amarillamiento generalizado hasta llegar a la defoliación (Flores *et al.*, 2015).

El Huanglongbing causa serias pérdidas a la citricultura al provocar que los árboles inicialmente se tornen improductivos y posteriormente les causa la muerte. Aunado a ello, no se tiene conocimiento de alguna cura hasta el momento (Granados-Ramírez y Hernández-Hernández, 2018). Esta enfermedad presenta una amplia distribución y rápida diseminación encontrándose presente a lo largo de los continentes asiático, africano y americano (Ferrarezi *et al.*, 2020). En este último se ha extendido rápidamente desde su entrada por Brasil en 2004 llegando a México en menos de una década (Gottwald y Huang, 1991; Mara y Peyrou, 2010; NAPPO, 2012). Su diseminación se debe a la compleja interacción entre hospedero (cítrico), el patógeno asociado (bacteria), el vector que lo transmite (*Diaphorina citri* Kuwayama y *Trioza erytrae*) y el ambiente (principalmente factores climáticos); siendo considerada como la enfermedad más destructiva para los cítricos en el mundo (Santivañez *et al.*, 2013) ya que ha ocasionado la eliminación de más de 100 millones de árboles en todo el mundo (FAO, 2013).

En el continente americano la bacteria es transmitida por el Psílido Asiático de los Cítricos (PAC) *Diaphorina citri* Kuwayama (Holguín *et al.*, 2012). Este psílido fue reportado en México por primera vez en el año 2002, en el estado de Campeche; sin

embargo, el HLB se detectó hasta julio 2009 en la localidad del Cuyo, municipio de Tzimin, Yucatán (SINAVEF, 2010). Actualmente, la enfermedad está presente en 24 estados citrícolas del país, incluyendo Tabasco (SENASICA, 2018), donde se detectó por primera vez en septiembre de 2012 en una ruta de muestreo en traspatio con árboles de naranjo agrio en el municipio de Tenosique (SIAP, 2017).

Una herramienta para el estudio de fenómenos geográficos en ecología y sistemática son los modelos de distribución de especies (Peterson *et al.*, 2002), que pueden ser epidemiológicamente relevantes para comprender el establecimiento de diversas enfermedades, siendo Huanglongbing una de ellas. En general, los métodos de modelación combinan datos de presencia de las especies con variables ambientales, para crear un modelo de requerimientos de la especie de acuerdo a las variables examinadas (Anderson *et al.*, 2003). Para este trabajo se usó el método de máxima entropía (MaxEnt), el cual es un método de aprendizaje automático de propósito general con una formulación matemática simple y precisa (Phillips *et al.*, 2006). De acuerdo con Ávila *et al.*, (2014) el modelo obtenido con MaxEnt es uno de los que mejor se ajusta a la distribución de especies.

El método de modelado con MaxEnt ha demostrado buenos resultados al generar modelos de distribución para la vigilancia de plagas y enfermedades. Narouei-Khandan *et al.*, (2016), modelaron la distribución de la enfermedad del huanglongbing y su vector (*Diaphorina citri* Kuwayama) con énfasis en Estados Unidos, obteniendo con MaxEnt el valor AUC de 0,69 que indica un modelo aceptable como señala Peterson *et al.*, (2011) pronosticando las ocurrencias actuales de las especies objetivo. Savino *et al.*, (2015), trabajaron también con MaxEnt para predecir la distribución potencial de 3 especies de insectos, donde obtuvieron valores de AUC superiores a 0.9, concluyendo que MaxEnt resulta ser una herramienta robusta utilizando datos de presencia, incluso con pocos datos, mejorando el desempeño de otras técnicas tradicionales.

El presente estudio tuvo como objetivo determinar las zonas potenciales para el establecimiento de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco, a través del modelo de máxima entropía (MaxEnt), para la identificación de áreas de riesgo, que sirva como insumo para fortalecer los procesos de vigilancia y planeación en el manejo de la enfermedad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

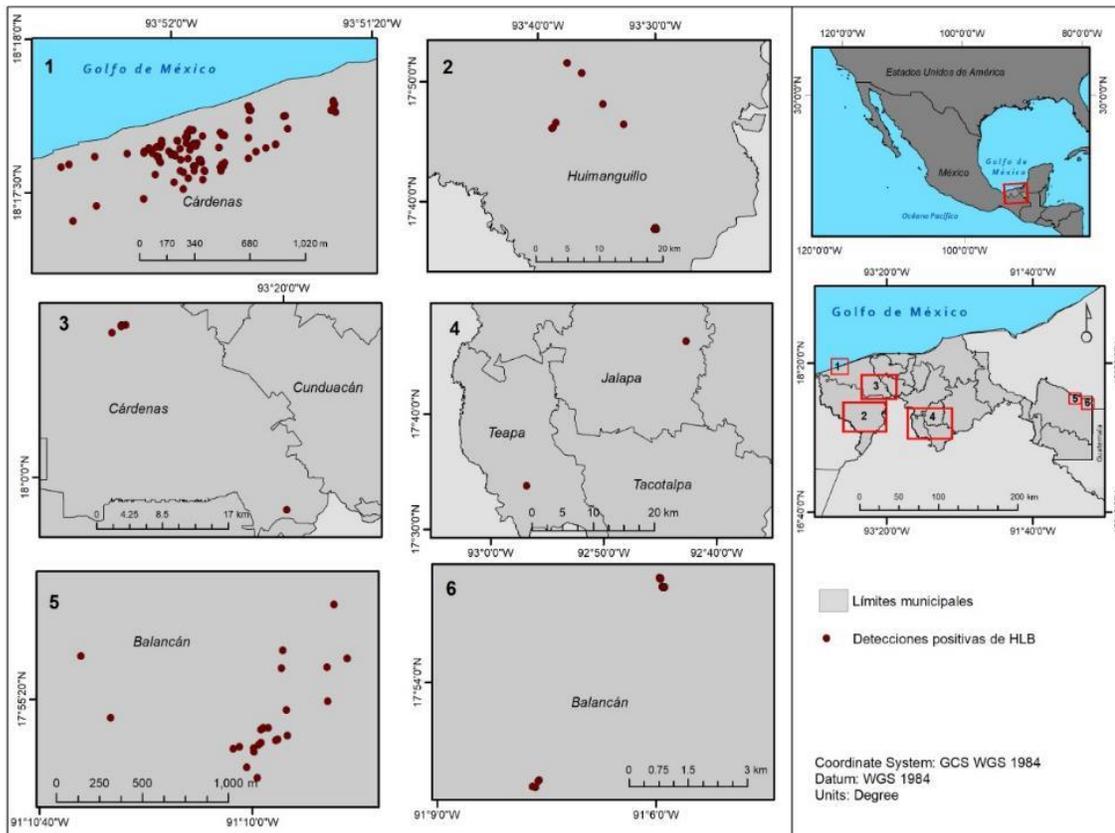
El área de cobertura del modelo corresponde al estado de Tabasco, el cual se ubica en el sureste de la república mexicana entre las coordenadas 17°15'03" y 18°39'03" de latitud norte y 90°59'15" y 94°07'48" de longitud oeste (Figura 1); con superficie de 24, 731 km<sup>2</sup> lo que representa el 1.3 % del país; forma parte de las provincias fisiográficas de la Planicie Costera del Golfo Sur con el 96 %, y Sierras de Chiapas y Guatemala con el 4 %, presenta clima cálido húmedo con temperatura promedio de 27 C° y una precipitación anual promedio de 2,550 mm (INEGI, 2017).

Para elaborar el modelo se utilizó el programa de predicción MaxEnt versión 3.4.1 ya que además de ser uno de los modelos de distribución de especies más utilizado para simulaciones realistas de hábitats de especies (Yan *et al.*, 2020), ha mostrado un rendimiento superior en la precisión de los pronósticos sobre la distribución de especies (Yi *et al.*, 2017) y presenta mejores resultados al compararlos con otros modelos aun teniendo pocos datos (Zhan *et al.*, 2016).

Ahora bien, la precisión de cualquier modelo incluyendo el presente, depende en gran medida no solo de sus algoritmos de cálculo, sino también de la

calidad y confiabilidad de los datos que se utilizan para alimentarlo. En este sentido, los factores ambientales son importantes de considerar, ya que definen la distribución espacial de cualquier especie y con ello la aparición y desarrollo de plagas y enfermedades (Wang *et al.*, 2019). De acuerdo con Kreakie *et al.*, (2012) los factores bióticos como los registros de presencia de organismos y los abióticos como la temperatura y humedad entre otros, son parte clave en el desarrollo de los modelos de distribución de especies.

Bajo este contexto, las variables climáticas y ambientales más importantes asociadas a la especie en estudio se determinaron a partir de la prueba de Jackknife. Esta prueba crea un gráfico al usar cada variable de manera aislada y adicionalmente genera otro con todas las variables, donde determina la ganancia de cada una en la creación del modelo (Ávila *et al.*, 2014). Las variables climáticas y edafológicas utilizadas para la modelación de la distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco se encuentran enlistadas en la Tabla 1. El modelo también se alimentó con las coordenadas geográficas de registros de casos positivos de presencia de HLB en el estado.



**Figura 1.** Mapa de localización del área de estudio. Los puntos muestran las detecciones positivas de HLB en material vegetal (Elaborado por los autores).

**Tabla 1. Variables climáticas y edafológicas utilizadas para la modelación de la distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco.**

Variable	Variable
Temperatura promedio anual	Temperatura promedio del trimestre más frío
Oscilación diurna de la temperatura	Precipitación anual
Isotermalidad	Precipitación del periodo más lluvioso
Estacionalidad de la temperatura	Precipitación del periodo más seco
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido	Estacionalidad de la precipitación
Temperatura mínima promedio del periodo más frío	Precipitación del trimestre más lluvioso
Oscilación anual de la temperatura	Precipitación del trimestre más seco
Temperatura promedio del trimestre más lluvioso	Precipitación del trimestre más cálido
Temperatura promedio del trimestre más seco	Precipitación del trimestre más frío
Temperatura promedio del trimestre más cálido	Tipos de suelos

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Worldclim.

La ubicación geoespacial de los casos positivos de huanglongbing (Figura 1) en el estado de Tabasco fueron tomados de los registros de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) del estado de Tabasco; estos datos fueron revisados, eliminándose los registros con coordenadas erróneas (fuera del área de estudio, duplicados, coordenadas incompletas), obteniéndose 195 referencias de presencia de *Candidatus Liberibacter asiaticus* que se integraron en una base de datos para ser utilizados en el software QGIS 2.18.19.

La información ambiental se obtuvo de la base de datos de Worldclim ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)), que incluye 20 variables climáticas (Tabla 1), de tipo ráster con resolución de 1 km<sup>2</sup>; las cuales, se recortaron para el estado de Tabasco. Así mismo, se utilizó el mapa de suelos de Tabasco tomado de Jiménez *et al.*, (2013). Todas las capas se almacenaron en formato ASCII.

De los registros de presencia, el 75% fueron utilizados como puntos de entrenamiento (Phillips *et al.*, 2006) y el 25% como puntos de validación, empleándose un máximo de 500 iteraciones. En la modelación se consideró una prueba de sensibilidad gráfica de área bajo la curva (AUC) y la prueba de Jackknife que evalúa la importancia variable (Narouei-Khandan *et al.*, 2016), las cuales son implementos de MaxEnt.

Para el análisis se utilizó el área bajo la curva (AUC) la cual traza predicciones positivas verdaderas contra predicciones falsas positivas calculándose en una matriz de confusión que comprende la frecuencia de cada tipo de predicción binaria (Narouei-Khandan *et al.*, 2016), estimando la capacidad de predicción. En general, los valores del AUC entre 0.7 y 0.9 para los datos de entrenamiento y de prueba, indican que el modelo es bueno y aquellos con valores mayores a 0.9

como modelos muy buenos representando mayor probabilidad de ocurrencia de la especie (Peterson *et al.*, 2011).

## RESULTADOS

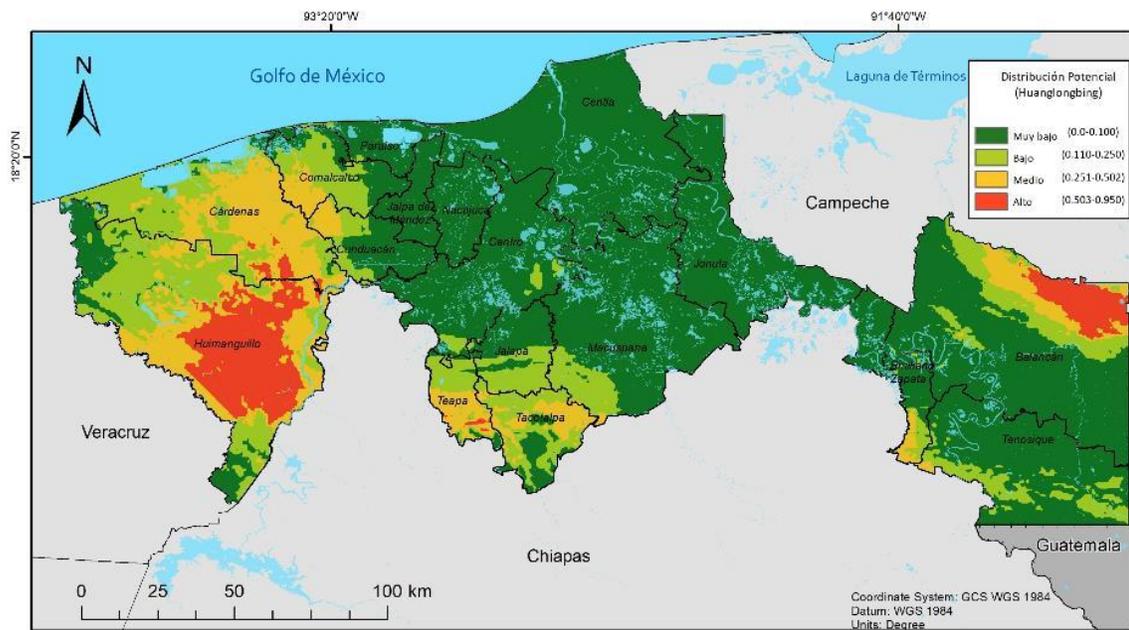
En el estado de Tabasco la distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing se presenta con una fuerte variabilidad entre las diferentes zonas que lo conforman. En el modelo generado, los valores para las distintas zonas oscilaron entre 0.01 a 0.95. A partir de estos valores se determinaron cuatro clases de distribución potencial de la enfermedad, donde se puede observar que más del 60% (15,496.64 km<sup>2</sup>) de la superficie perteneciente a la entidad cuenta con muy baja probabilidad de presencia del HLB. De igual forma, el modelo muestra que únicamente el 7% del territorio estatal equivalente a 1,596.90 km<sup>2</sup> presenta una alta distribución potencial de la enfermedad y que esta se concentra principalmente en torno a las partes Suroeste y Este del estado, hacia los municipios de Huimanguillo y Balancán respectivamente (Figura 2). El resto del territorio analizado (30%) en el modelo se encuentra entre las clases con bajo (4,622.88 km<sup>2</sup>) y medio (2,745.56 km<sup>2</sup>) potencial de distribución del HLB. Esta última clase se encuentra fragmentada en gran parte del territorio en la entidad, mostrando mayores áreas de distribución potencial en comparación con las clases alta y media. En la figura 2 puede observarse a mayor detalle la distribución de las clases en el territorio cubierto por el modelo.

Del modelo de distribución potencial para el estado de Tabasco se graficaron las clases por municipios de acuerdo con sus superficies mostrando que, de los 17 municipios que conforman el estado, cuatro concentran un alto potencial de distribución para el HLB con valores entre 0.503-0.950 (Figura 2) de los

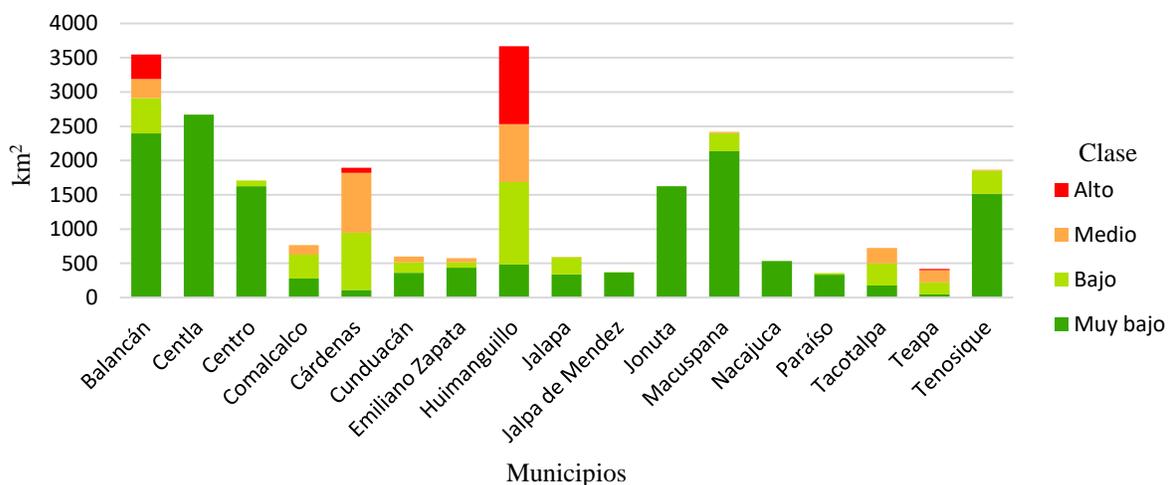
cuales, el de mayor superficie es el municipio de Huimanguillo con 1139 km<sup>2</sup>, seguido de Balancán con 358.17 km<sup>2</sup>, Cárdenas con 75.93 km<sup>2</sup> y Teapa con 16.43 km<sup>2</sup> (Figura 3). Mientras que las clases con potencial medio y bajo mostraron a los municipios de Cárdenas y Huimanguillo como los de mayor superficie (Figura 3). Por otro lado, los municipios de Centla, Jonuta y Nacajuca presentan una distribución con potencial muy bajo (Figura 3).

la especificidad (probabilidad de obtener un resultado negativo sea ausente o presente) se mantiene en cero o con valores menores a 0.1 hasta que la sensibilidad (probabilidad de obtener un resultado de presencia cuando la especie está presente) alcanza valores superiores a 0.8, lo que nos da como valores del área bajo la curva (AUC) de 0.936 en los datos de entrenamiento, lo que sugiere que el modelo tiene una alta capacidad de predecir correctamente (Phillips *et al.*, 2006).

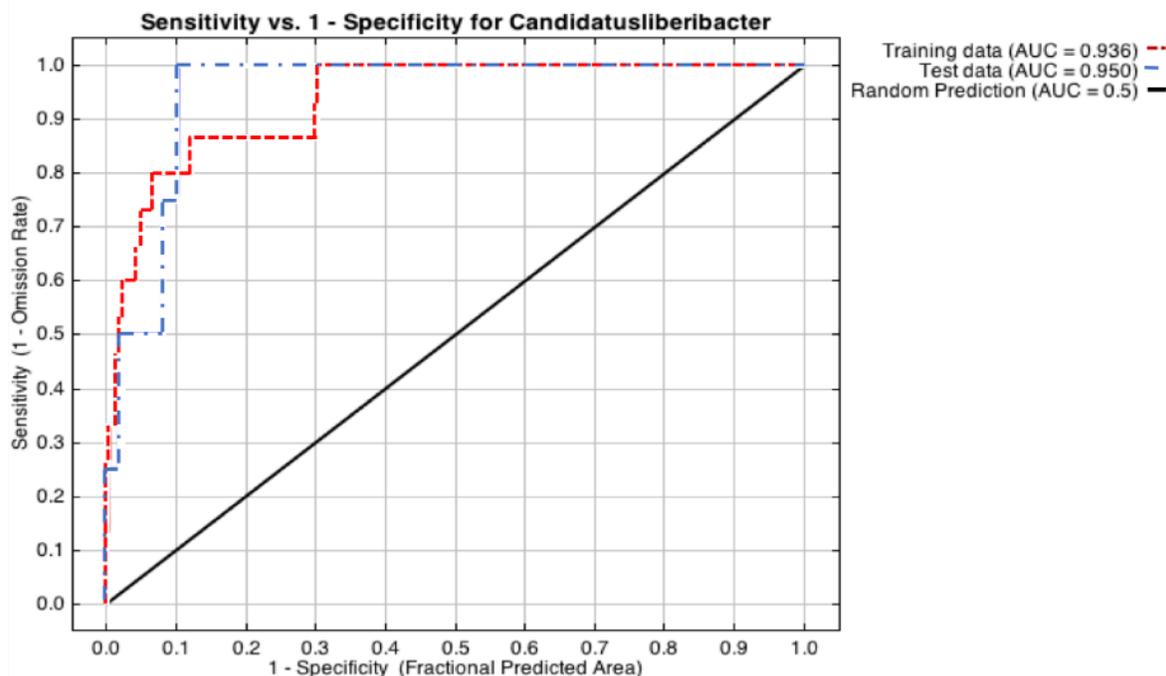
En la figura 4 se observa la curva Receiver Operating Characteristic (ROC) y su ajuste del modelo generado,



**Figura 2.** Modelo de distribución potencial de la enfermedad del Huanglongbing en el estado de Tabasco (Fuente: elaborado por los autores).



**Figura 3.** Distribución potencial en km<sup>2</sup> por clase para cada municipio.



**Figura 4.** Área bajo la curva (AUC) de *Candidatus Liberibacter asiaticus*, operada por el receptor ROC para los datos de entrenamiento y datos de prueba del modelo.

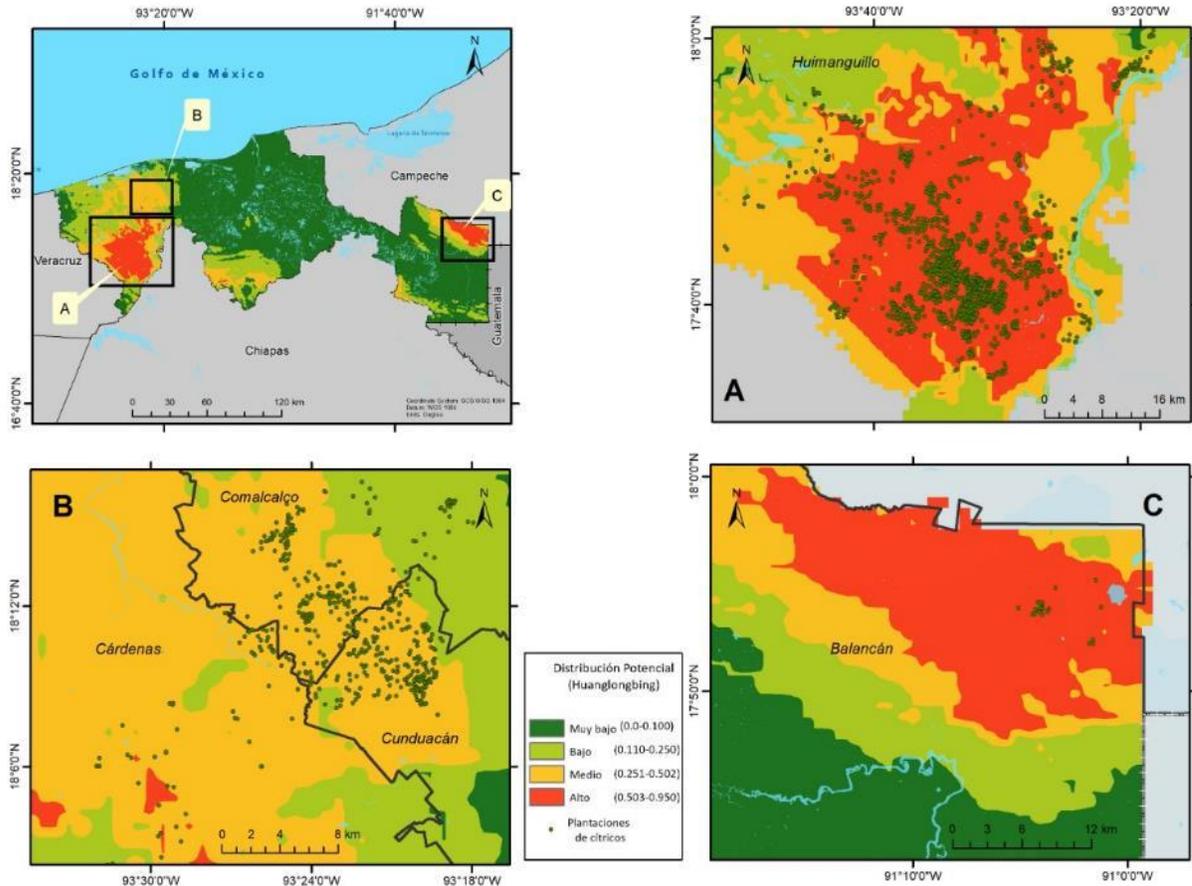
Los parámetros climáticos tuvieron una fuerte influencia en el modelo generado para la distribución potencial de la enfermedad del Huanglongbing en el estado de Tabasco. Las variables con mayor incidencia fueron la temperatura promedio del trimestre más cálido, la temperatura máxima promedio del periodo más cálido y la oscilación anual de la temperatura (Tabla 2). Los diferentes tipos de suelo existentes en el área de cobertura del modelo contribuyeron conjuntamente en buena medida al alcanzar el 89% de la interacción del modelo.

## DISCUSIÓN

Los modelos de distribución de especies han demostrado ser herramientas de gran utilidad para identificar zonas de riesgo potencial para plagas y enfermedades (Srivastava, *et al.*, 2019). Estos modelos predicen con gran precisión la ubicación de nichos de patógenos y vectores en función de la interacción de variables ambientales con el registro actualizado de su presencia en campo (Cruz-Cárdenas, *et al.*, 2014). Uno de los modelos de distribución de especies más utilizado en simulaciones realistas de hábitats de especies (Yan *et al.*, 2020) por la precisión de sus pronósticos de distribución (Yi *et al.*, 2017) y resultados aun cuando se tengan pocos datos es MaxEnt (Zhan *et al.*, 2016).

**Tabla 2. Contribuciones relativas de las variables climáticas y edafológicas utilizadas en la modelación de la distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco.**

Variable	Contribución al modelo (%)
Isotermalidad	0.1
Estacionalidad de la temperatura	1.1
Temperatura máxima promedio del periodo más cálido	24.4
Temperatura mínima promedio del periodo más frío	0.5
Oscilación anual de la temperatura	12.7
Temperatura promedio del trimestre más lluvioso	1.1
Temperatura promedio del trimestre más cálido	0.7
Temperatura promedio del trimestre más frío	42.9
Precipitación del periodo más lluvioso	1.9
Precipitación del periodo más seco	1.2
Precipitación del trimestre más lluvioso	1.9
Precipitación del trimestre más cálido	2
Precipitación del trimestre más frío	0.3
Tipos de suelos	9.1



**Figura 5.** A) Plantaciones de cítricos en Huimanguillo en contraste con el modelo de distribución potencial. B) Zonas con riesgo medio-alto en los municipios de Comalcalco, Cárdenas y Cunduacán en contraste con plantaciones cítricas. C) Noreste de Balancán con riesgo alto de acuerdo con el modelo de distribución potencial (Fuente: elaborado por los autores).

La distribución potencial de la enfermedad del huanglongbing para el estado de Tabasco estimada a partir del programa MaxEnt utilizando los registros de presencia, así como 20 variables climáticas y ambientales, muestra una mayor probabilidad de presencia en la zona norte de Balancán y en el 87% del municipio de Huimanguillo. Como se observa en la figura 5-A, las parcelas de cítricos de Huimanguillo serían las que estarían en mayor riesgo ya que a este municipio corresponde el 94.1% de la producción estatal; es decir, 14,647 hectáreas sembradas con cítricos que se traduce en una gran cantidad de hospederos para el vector de la enfermedad (SIAP, 2019).

Palomo *et al.*, (2017), mencionan que la bacteria presenta una perfecta adaptación con su hospedador (cítricos) y su vector (*Diaphorina citri* Kuwayama). Al mismo tiempo que esta prefiere elevaciones bajas de 360 m.s.n.m. y tolera temperaturas calurosas entre los 27 a 35 °C (Ramos, 2008), lo que coincide con las elevaciones y temperaturas que registra el municipio de Huimanguillo, además de la gran cantidad de

hospederos del vector que presenta al ser el mayor productor de cítricos en el estado de Tabasco con 82 mil 95 toneladas para el año 2018 (SADER, 2018). Esto sugiere que el modelo de distribución de la enfermedad huanglongbing generado coincide con los requerimientos ecológicos de la bacteria *Candidatus Liberibacter asiaticus* responsable de la enfermedad.

Por otra parte, las variables con mayor contribución al modelo coinciden con los obtenidos por Olvera-Vargas *et al.*, (2020) donde las variables “rango anual de temperatura y temperatura máxima del mes más cálido” crean condiciones adecuadas para el establecimiento del vector y la enfermedad. Igualmente, los resultados que obtuvieron Ajene *et al.*, (2020) en su estudio para África, mostraron que las variables precipitación y temperatura son las de mayor contribución al modelo.

En este sentido, el ajuste del modelo es muy bueno con un AUC de 0.936 para los datos de entrenamiento y de acuerdo con Benito y Peñas, (2007), la técnica Receiver Operating Characteristic (ROC) es aceptada

como un método estándar para evaluar la exactitud de los modelos de distribución predictiva. También, es importante considerar las variables climáticas en la elaboración del modelo, ya que se está expuesto a tener errores en el diseño, por lo que es importante agregar información como tipos de suelos, influencia antropogénica, entre otras, para generar un modelo más completo y cercano a la realidad (Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez, 2014). Para este trabajo se utilizó la capa de suelos de Jiménez *et al.*, (2013), la cual es una variable que influye en el modelo generado, con una contribución de 9.1%.

Tal como señalan Torres-Pacheco *et al.*, (2013), Tabasco se encuentra entre los estados con máxima idoneidad en temperatura para el cultivo de cítricos, favoreciendo esta variable la producción de brotes vegetativos que aumentan el establecimiento de *Diaphorina citri* Kuwayama. Actualmente, se encuentran alrededor de 2204 parcelas de cítricos en todo el estado con cultivos de limón, naranja, tangerina y toronja. De estas, se ha detectado la enfermedad del huanglongbing en 151 parcelas acorde con los datos de la SADER. Por otro lado, la zona citrícola de Comalcalco (Figura 5-B) se encuentra libre de la enfermedad, pero presenta un nivel de riesgo potencial medio-alto de acuerdo con el modelo de distribución. La figura 5-C, muestra las plantaciones de cítricos en una zona del municipio de Balancán que presentan un riesgo potencial alto. Los municipios de Centla, Jonuta y Nacajuca presentan una distribución potencial para el establecimiento de la enfermedad de muy baja a baja y considerando que Centla cuenta actualmente con 100 ha de cítricos establecidas, sería interesante evaluar los rendimientos que se obtienen en estas plantaciones y con los resultados, valorar la posibilidad de incentivar el crecimiento de estas zonas citrícolas del estado. Por su parte, Nacajuca aún no cuenta con plantaciones comerciales y Jonuta únicamente reportó el establecimiento de 5 ha de limón persa y naranja valenciana en el año 2019 (SIAP, 2019), lo que lleva a sugerir que deben conducirse estudios de idoneidad en el establecimiento de cítricos en esta zona, dado el bajo potencial que presentan para el establecimiento del HLB. El conocer las zonas de riesgo es fundamental en el entendimiento de la presencia de cualquier plaga o enfermedad (Díaz-Padilla *et al.*, 2014).

La mayoría de los modelos son dirigidos a la distribución del vector (Torres-Pacheco *et al.*, 2013). Sin embargo, este trabajo destaca la distribución de la enfermedad con puntos de presencia del patógeno generando resultados como los obtenidos por Ajene *et al.*, (2020) y Olvera-Vargas *et al.*, (2020) que demuestran el potencial e importancia de los modelos de distribución como herramienta para predecir el posible establecimiento de la enfermedad del HLB.

## CONCLUSIONES

El modelo de distribución potencial para el establecimiento de la enfermedad del huanglongbing en el estado de Tabasco generado a través de análisis geoespacial y modelación climática con el modelo de máxima entropía (MaxEnt), es una buena aproximación para la identificación de áreas con riesgo potencial de presentar *Candidatus Liberibacter*. Acorde con los valores obtenidos para el área de cobertura del modelo, se determinaron cuatro clases de distribución potencial de la enfermedad. El 7% del territorio que presenta una alta distribución potencial para HLB se concentra principalmente en los municipios de Huimanguillo y Balancán. La temperatura, humedad y tipos de suelo fueron los parámetros ambientales clave en el desarrollo del modelo de distribución de la especie. El uso de modelos de distribución de especies como herramienta facilita la vigilancia, planeación y manejo del territorio al precisar las zonas de vigilancia del patógeno y su vector, al tiempo que en conjunto con otros estudios define las zonas potenciales a incentivar para el crecimiento productivo de cítricos en el estado.

### Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su beca de doctorado. Se agradece el apoyo en esta investigación a la Dra. Coral Pacheco de la DACBioI-UJAT.

**Financiamiento.** Al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de beca en el programa de posgrado.

**Conflicto de interés.** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

**Cumplimiento de estándares de ética.** Se han cumplido todos los estándares éticos.

**Disponibilidad de datos.** Los datos se encuentran disponibles con Gladis Y. Martínez-Martínez (agro\_martinez@hotmail.com) previa solicitud razonable.

## REFERENCIAS

- Ajene, I.J., Khamis, F., Van Asch, B., Pietersen, G., Rasowo, B.A., Ekesi, S. and Mohammed, S., 2020. Habitat suitability and distribution potential of *Liberibacter* species (“*Candidatus Liberibacter asiaticus*” and “*Candidatus Liberibacter africanus*”) associated with citrus greening disease. *Diversity and Distributions*, 26(5), pp.575–588. DOI <https://doi.org/10.1111/ddi.13051>.

- Anderson, R.P., Lew, D. and Peterson, A.T., 2003. Evaluating predictive models of species distributions: Criteria for selecting optimal models. *Ecological modelling*, 162(3), pp.211–232. Available at: <<http://www.bionica.info/Biblioteca/Anderson2003PredictiveModels.pdf>> [Accessed 2 December 2020].
- Ávila, C.R., Villavicencio, G.R. and Ruiz, C.J.A., 2014. Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(24), pp.92–109. Available at: <[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-11322014000400009](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000400009)> [Accessed 13 Jun 2020].
- Benito, B. and Peñas, J., 2007. Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (7), pp.100–119. Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/28186522\\_Aplicacion\\_de\\_modelos\\_de\\_distribucion\\_de\\_especies\\_a\\_la\\_conservacion\\_de\\_la\\_biodiversidad\\_en\\_el\\_sureste\\_de\\_la\\_Peninsula\\_Iberica](https://www.researchgate.net/publication/28186522_Aplicacion_de_modelos_de_distribucion_de_especies_a_la_conservacion_de_la_biodiversidad_en_el_sureste_de_la_Peninsula_Iberica)> [Accessed 13 Jun 2020].
- Bové, J.M., 2012. Huanglongbing and the future of citrus in Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Plant Pathology*, 94 (3), pp.465–467. DOI: <http://dx.doi.org/10.4454/JPP.V94I3.001Ca>
- macho-Tapia, M., Rojas-Martínez, R.I., Rebollar-Alviter, Á., Aranda-Ocampo, S. and Suárez-Espinosa, J., 2016. Biological, ecological, epidemiological and management aspects of *Candidatus Liberibacter*. *Revista Chapingo serie horticultura*, 22(1), pp.5–16. DOI <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.09.021>
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Villaseñor, J.L. and Ortiz, E., 2014. Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), pp.188–199. DOI <https://doi.org/10.7550/rmb.36723>.
- Díaz-Padilla, G., López-Arroyo, J.I., Sánchez-Cohen, I., Guajardo-Panes, R.A., Mora-Aguilera, G. and Quijano-Carranza, J.Á., 2014. Áreas de abundancia potencial en México del vector del huanglongbing, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(7), pp.1137–1153. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i7.836>
- Esquivel-Chávez, F., Valdovinos-Ponce, G., Mora-Aguilera, G., Gómez-Jaimes, R., Velázquez-Monreal, J.J., Manzanilla-Ramírez, M.Á., Flores-Sánchez, J.L. and López-Arroyo, J.I., 2012. Análisis histológico foliar de cítricos agrios y naranja dulce con síntomas ocasionados por *Candidatus Liberibacter asiaticus*. *Agrociencia*, 46(8), pp.769–782. Available at: <[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952012000800003](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000800003)> [Accessed 13 Jun 2020].
- FAO, 2013. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Marco Estratégico para la Gestión Regional del Huanglongbing en América Latina y el Caribe. 1st ed.* [online] Santiago de Chile: CEPAL. Available at: <http://www.fao.org/3/i3319s/i3319s.pdf> [Accessed 10 August 2020].
- FAO, 2008. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Cambio climático, energía y alimentos.* [online] p.16. Available at: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/foodclimate/documents/HLCbrochure-sp.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/foodclimate/documents/HLCbrochure-sp.pdf) [Accessed 10 August 2020].
- Ferrarezi, R.S., Christopher, I.V., Urbaneja, A. and Machado, M.A., 2020. Unravelling Citrus Huanglongbing Disease. *Frontiers in plant science.* [online] (11). DOI <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609655>
- Flores-Sánchez, J.L., Mora-Aguilera, G., Loeza-Kuk, E., López-Arroyo, J.I., Dominguez-Monge, S., Acevedo-Sánchez, G. and Robles-García, P., 2015. Pérdidas en producción inducidas por *Candidatus Liberibacter Asiaticus* en Limón Persa en Yucatán, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33(2), pp.195–210. Available at: <[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-33092015000200195](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092015000200195)> [Accessed 11 Jun 2020].
- GET and INEGI, 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Anuario estadístico y geográfico de Tabasco. México.* [online] p.440. Available at: <[https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/users/planeacion\\_spf/ANUARIO%20ESTADISTICO%20WEB%2B%2B.pdf](https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/users/planeacion_spf/ANUARIO%20ESTADISTICO%20WEB%2B%2B.pdf)>. [Accessed 13 Jun 2020].
- Gottwald, T.R., Aubert, B. and Huang, K.L., 1991. International Organization of Citrus Virologists Conference Proceedings. *Spatial pattern analysis of citrus greening in*

- Shantou, China*. [online] pp.421–427. Available at: <<https://escholarship.org/uc/item/9rz5x2kw>> . [Accessed 2 December 2020].
- Gottwald, T.R., Graça, J.V. da and Bassanezi, R.B., 2007. Citrus Huanglongbing: The Pathogen and Its Impact. *Plant Health Progress*, 8(1), p.31. DOI <https://doi.org/10.1094/PHP-2007-0906-01-RV>.
- Granados-Ramírez, G.R. and Hernández-Hernández, R., 2018. Reconversión de cultivos como resultado de la presencia de huanglongbing en Colima, México. *Revista Geográfica de América Central*, 3(61E), pp.413–431. DOI <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.61-3.21>
- Gutierrez, N., 2014. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. *HLB de los cítricos (Huanglongbing)*. [online] Available at: <<https://sader.jalisco.gob.mx/fomento-agricola-hortofruticola-e-inocuidad/570>> [Accessed 12 May 2021].
- Holguín Peña, R.J., Hernández Montiel, L.G. and Ramón, R.Z., 2012. El huanglongbing: la tristeza de los cítricos. *Revista de divulgación científica y tecnológica de la universidad veracruzana*, [online] XXV(3). Available at: [https://www.uv.mx/cienciahombre/revista\\_e/vol25num3/articulos/huanglongbing/](https://www.uv.mx/cienciahombre/revista_e/vol25num3/articulos/huanglongbing/) [Accessed 9 August 2020].
- Jiménez R., R., Zavala, C.J. and Bautista, Z.F., 2013. Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. *Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico*. [online] Available at: <<https://1library.co/document/ozln892q-clasificacion-caracterizacion-suelos-tabasco-base-enfoque-geomorfopedologico.html>> [Accessed 13 May 2021].
- Kreakie, B.J., Fan, Y. and Keitt, T.H., 2012. Enhanced Migratory Waterfowl Distribution Modeling by Inclusion of Depth to Water Table Data. *PLOS ONE*, 7(1), p.e30142. DOI <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030142>.
- Mara, H. and Peyrou, M., 2010. *La citricultura de Argentina y Uruguay puede escapar a la amenaza del HLB*. [online] Available at: [https://www.fecier.org.ar/public/noticias/826\\_la-citricultura-de-argentina-y-uruguay-puede-escapar-a-la-amenaza-del-hlb.html](https://www.fecier.org.ar/public/noticias/826_la-citricultura-de-argentina-y-uruguay-puede-escapar-a-la-amenaza-del-hlb.html) [Accessed 13 Jun 2020].
- Mora-Aguilera, G., Robles-García, P., López-Arroyo, J.I., Flores-Sánchez, J., Acevedo-Sánchez, G., Domínguez-Monge, S., Gutiérrez-Espinosa, A., Loeza-Kuk, E. and González-Gómez, R., 2014. Situación actual y perspectivas del manejo del HLB de los cítricos. *Revista mexicana de fitopatología*, 32(2), pp.108–119. Available at: <[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-33092014000200108](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092014000200108)> [Accessed 11 Jun 2020].
- NAPPO, 2012. North American Plant Protection. *Protocolo de diagnósticos de la NAPPO*. [online] p.10. Available at: [https://www.napso.org/application/files/1515/9353/4531/DP\\_2\\_HLB\\_04-10-2012-s.pdf](https://www.napso.org/application/files/1515/9353/4531/DP_2_HLB_04-10-2012-s.pdf) [Accessed 9 August 2020].
- Narouei-Khandan, H.A., Halbert, S.E., Worner, S.P. and van Bruggen, A.H.C., 2016. Global climate suitability of citrus huanglongbing and its vector, the Asian citrus psyllid, using two correlative species distribution modeling approaches, with emphasis on the USA. *European Journal of Plant Pathology*, 144(3), pp.655–670. DOI <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0804-7>.
- Olvera-Vargas, L.A., Quiroz Gaspar, Á. de J., Contreras-Medina, D.I. and Aguilar-Rivera, N., 2020. Potential risk analysis of Huanglongbing through geospatial technology in Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), pp.e1552–e1552. DOI [https://doi.org/10.21930/rcta.vol21\\_num3\\_art:1552](https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1552)
- Palma-Ordaz, S. and Delgadillo-Rodríguez, J., 2014. Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*, 92(4), pp.587–597. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.135>
- Palomo, J.L., Siverio, F. and Jaime, C., 2017. Candidatus Liberibacter: Agentes causales de enfermedades importantes en cultivos de interés en España. *Fitopatología*, pp.15–22. Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/323178654\\_Candidatus\\_Liberibacter\\_agentes\\_causales\\_de\\_enfermedades\\_importantes\\_en\\_cultivos\\_de\\_interes\\_en\\_Espana](https://www.researchgate.net/publication/323178654_Candidatus_Liberibacter_agentes_causales_de_enfermedades_importantes_en_cultivos_de_interes_en_Espana)> [Accessed 11 Jun 2020]. Peterson, A.T., Sánchez-Cordero, V., Beard, C.B. and Ramsey, J.M., 2002. Ecologic niche modeling and potential reservoirs for Chagas disease, Mexico. *Emerging infectious diseases*, 8(7), p.662. DOI <https://doi.org/10.3201/eid0807.010454>

- Peterson, A.T., Soberón, J., Pearson, R.G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. and Araújo, M.B., 2011. *Ecological niches and geographic distributions* (MPB-49). [online] Princeton University Press. Available at: <<https://press.princeton.edu/books/paperback/9780691136882/ecological-niches-and-geographic-distributions-mpb-49>> [Accessed 17 November 2020].
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3–4), pp.231–259. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jcz.2015.08.002>.
- Ramos Méndez, C., 2008. Huanglongbing (“citrus greening”) y el psílido asiático de los cítricos, una perspectiva de su situación actual. *Portal Agrosanitario*, 5, p.10. Available at: <[https://swfrec.ifas.ufl.edu/hlb/database/pdf/21\\_Ramos\\_08.pdf](https://swfrec.ifas.ufl.edu/hlb/database/pdf/21_Ramos_08.pdf)> [Accessed 14 August 2020].
- Santivañez, T., Mora Aguilera, G., Díaz Padilla, G., Lopez Arrollo, J.I. and Vernal Hurtado, P., 2013. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *Citrus: Marco estratégico para la gestión regional del Huanglongbing en América Latina y el Caribe*. [online]. Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/275640678\\_Citrus\\_Marco\\_Estrategico\\_para\\_la\\_Gestion\\_Regional\\_del\\_Hanglongbing\\_en\\_America\\_Latina\\_y\\_el\\_Caribe](https://www.researchgate.net/publication/275640678_Citrus_Marco_Estrategico_para_la_Gestion_Regional_del_Hanglongbing_en_America_Latina_y_el_Caribe)> [Accessed 4 Jun 2020].
- Savino, G.C.M.A., Zerda, H.R. and Diodato, L., 2015. *Modelos de distribución potencial de especies*. In: Día del SIG 2014, 1st ed. [online] Universidad Nacional de Santiago del Estero. Facultad de Ciencias Forestales. pp.30-36. Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/286927344\\_Modelos\\_de\\_Distribucion\\_Potencial\\_de\\_Especies](https://www.researchgate.net/publication/286927344_Modelos_de_Distribucion_Potencial_de_Especies)> [Accessed 11 December 2020].
- SADER, 2018. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. *Producción de cítricos en Tabasco. Limón, fuente de ingreso en municipios de Tabasco*. [online] Available at: <https://www.gob.mx/sader/tabasco/articulos/produccion-de-citricos-en-tabasco?idiom=es> [Accessed 16 November 2020].
- SENASICA, 2018. Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. *Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria*. [online] Available at: <<http://sinavef.senasica.gob.mx/SIRVEF/HLB.aspx>> [Accessed 18 November 2020].
- SIAP, 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. *Huanglongbing, análisis epidemiológico Tabasco*. [online]. Available at: <https://nube.siap.gob.mx> [Accessed 11 Jun 2020].
- SIAP, 2019. Anuario estadístico de la producción agrícola: Cierre de la producción agrícola por municipio. [online] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Available at: <<https://nube.siap.gob.mx/cierreaagricola/>> [Accessed 18 November 2020].
- SINAVEF, 2010. Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. *Reporte Epidemiológico Huanglongbing (HLB), San Luis Potosí*. [online] Available at: <<http://langif.uaslp.mx/documentos/privada/BoletinesVarios/hlb/005.pdf>> [Accessed 18 November 2020].
- SINAVIMO, 2019. Sistema Nacional de Vigilancia y Monitoreo de Plagas. *Candidatus Liberibacter asiaticus. Gobierno de Argentina*. [online] Available at: <https://www.sinavimo.gob.ar/plaga/candidatus-liberibacter-asiaticus> [Accessed 23 November 2020].
- Srivastava, V., Lafond, V. and Griess, V., 2019. Species distribution models (SDM): applications, benefits and challenges in invasive species management. *CAB Reviews Perspectives in Agriculture Veterinary Science Nutrition and Natural Resources*, 14, pp.1–13. DOI <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201914020>.
- SVT, 2017. Sanidad Vegetal Tabasco. SENASICA, SAGARPA. *Programa de trabajo de la campaña contra el Huanglongbing de los cítricos del incentivo de prevención de plagas fitosanitarias reglamentadas del programa de sanidad e inocuidad agroalimentaria 2017 del Estado de Tabasco*. [online]. p.6. Available at: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/491040/Tabasco\\_HLB.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/491040/Tabasco_HLB.pdf) [Accessed 23 November 2020].
- Torres-Pacheco, I., López-Arroyo, J.I., Aguirre-Gómez, J.A., Guevara-González, R.G., Yáñez-López, R., Hernández-Zul, M.I. and Quijano-Carranza, J.A., 2013. Potential distribution in Mexico of Diaphorina citri (Hemiptera: Psyllidae) vector of Huanglongbing pathogen. *Florida Entomologist*, 96 (1), pp.36–47. Available at: <https://www.jstor.org/stable/23608870?seq=1> [Accessed 4 Jun 2020].

- Wang, R., Yang, H., Luo, W., Wang, M., Lu, X., Huang, T., Zhao, J. and Li, Q., 2019. Predicting the potential distribution of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Kuwayama), in China using the MaxEnt model. *PeerJ*, 7, p.e7323. DOI <https://doi.org/10.7717/peerj.7323>.
- Yan, H., Feng, L., Zhao, Y., Feng, L., Zhu, C., Qu, Y. and Wang, H., 2020. Predicting the potential distribution of an invasive species, *Erigeron canadensis* L., in China with a maximum entropy model. *Global Ecology and Conservation*, 21, p.e00822. DOI <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00822>.
- Yi, Y., Cheng, X., Yang, Z., Wieprecht, S., Zhang, S. and Wu, Y., 2017. Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, pp.748–762. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.138>.
- Zhang, H., Luo, D., Mu, X., Xu, M., Wei, H., Luo, J., Zhang, J. and Hu, Y.-C., 2016. Predicting the potential suitable distribution area of the apple snail *Pomacea canaliculata* in China based on multiple ecological niche models. *Ying yong sheng tai xue bao = The journal of applied ecology / Zhongguo sheng tai xue xue hui, Zhongguo ke xue yuan Shenyang ying yong sheng tai yan jiu suo zhu ban*, 27, pp.1277–1284. DOI <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201604.027>.